



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

KONSTRUKČNÍ NÁVRH ZAŘÍZENÍ PRO NANÁŠENÍ PRÁŠKU ZA ZVÝŠENÝCH TEPLOT PRO TENKOSTĚNNÉ DÍLY

DESIGN OF DEVICE FOR POWDER RECOATING AT ELEVATED TEMPERATURES FOR THIN-WALLED PARTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

David Hertl

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Malý

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **David Hertl**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Martin Malý**
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Konstrukční návrh zařízení pro nanášení prášku za zvýšených teplot pro tenkostěnné díly

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V technologii Selective Laser Melting jsou díly tvořeny vrstvou po vrstvě tavením jemného kovového prášku laserem. Prášek je do oblasti tavby po každé vrstvě dopravován nanášecím zařízením. Při použití zvýšených teplot přehřevu dochází, jak ohřevu prášku, tak prostoru stavby včetně nanášecího zařízení. Standardně používané nanášecí zařízení není pro takové provozní podmínky určeno.

Typ práce: vývojová – konstrukční

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem práce je konstrukční návrh zařízení pro nanášení práškového materiálu pro tenkostěnné díly při teplotách do 600 °C pro 3D tiskárnu SLM 280HL.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- identifikace návrhových limitů pro nanášecí zařízení: použitelné konstrukční materiály, rozměry zařízení atd.,
- návrh úprav stávajícího nanášecího zařízení pro práci za zvýšených teplot a zpracování tenkostěnných dílů,
- návrh vlastní konstrukce nanášecího zařízení s předešlým práškem.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, výkresy součástí, výkres sestavení, digitální data.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske-studium-ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

KÖRPERICH, J.P. a M. MERKEL. Thermographic analysis of the building height impact on the properties of tool steel in selective laser beam melting. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* [online]. 2018, 49(5), 689–695. ISSN 09335137. Dostupné z: doi:10.1002/mawe.201800010.

SHIGLEY, J.E., MISCHKE, Ch.R., BUDYNAS, R.G.: *Konstruování strojních součástí. Překlad 7.* vydání, VUTIUM, Brno 2010, 1186 s, ISBN 978-80-214-2629-0.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce se zabývá problematikou 3D tisku metodou Selective Laser Melting za vyšších teplot s využitím předehřevu. Cílem práce je návrh nanášecího zařízení pro tenkostěnné díly pro tiskárnu 280HL od společnosti SLM Solutions. Byly rozebrány současné metody předehřevu a na základě jejich zhodnocení bylo navrženo nové nanášecí zařízení. Zařízení poskytuje možnost předehřevu na teploty do 400 °C.

KLÍČOVÁ SLOVA

Selective laser melting, teplota, vyhřívání, nanášec, stěrka

ABSTRACT

The thesis deals with the influence and methods of preheating on 3D printing using Selective Laser Melting. The aim of the thesis is to design of powder coating device for printing thin-walled parts at elevated temperatures for SLM 280HL by SLM Solutions. New device was designed based on the research of current methods of preheating. Designed device is capable of preheating temperatures up to 400 °C.

KEYWORDS

Selective laser melting, temperature, heating, recoater, wiper

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HERTL, David. *Konstrukční návrh zařízení pro nanášení prášku za zvýšených teplot pro tenkostěnné díly*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124485>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Martin Malý.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Martinovi Malému za odborné vedení při práci, jeho trpělivost a čas, který mi věnoval i přes nepříznivé období pandemie. Dále bych rád poděkoval své rodině za podporu během celého studia.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Martina Malého. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1	Možnosti předehřevu	14
2.1.1	Předehřev stavební plochy	14
2.1.2	Nanášení pomocí válečku s předehřevem	15
2.1.3	Předehřev prášku před nanášením	16
2.1.4	Předehřev prášku laserem	17
2.1.5	Předehřev ochranné atmosféry	19
2.1.6	Předehřev prostoru stavební komory	20
2.2	Nanášení prášku	21
2.3	Řešení předehřevu na stávajícím zařízení	22
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	25
3.1	Analýza problému	25
3.2	Cíle práce	27
4	KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ	28
4.1	Návrh úprav stávajícího zařízení	28
4.1.1	Pevná stěrka	28
4.1.2	Poddajná stěrka	29
4.2	Návrh vlastního zařízení	30
5	KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	31
5.1	System nanášení	34
5.1.1	System dávkování	34
5.1.2	System polohování stěrky	36
5.2	System předehřevu	37
5.2.1	Volba topných těles	37
5.2.2	Návrh topných patron	38
5.3	Konstrukční materiály	39
5.3.1	Ocelové materiály	39
5.3.2	Izolační materiál	40
5.3.3	Těsnicí materiál	41
6	DISKUZE	42

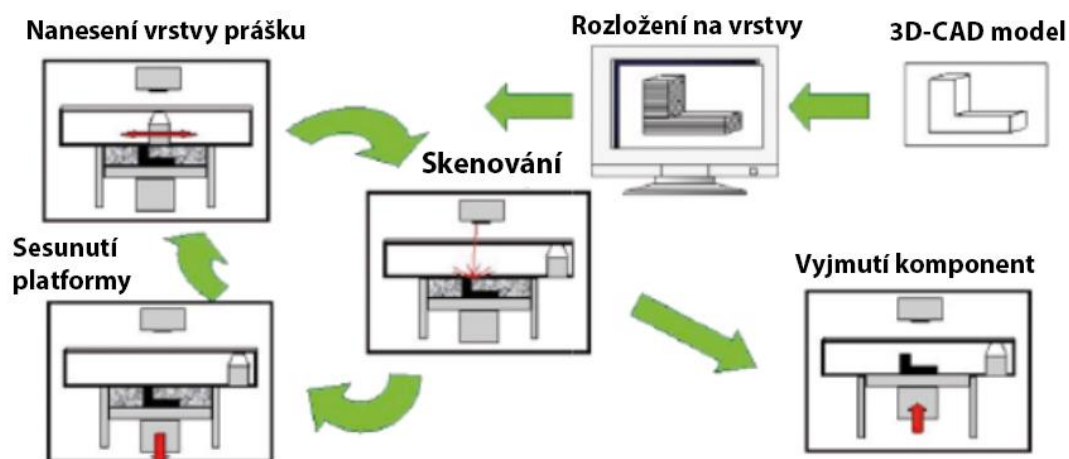
7	ZÁVĚR	43
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	44
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	46
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	47
11	SEZNAM TABULEK	48
12	SEZNAM PŘÍLOH	49

1 ÚVOD

Technologie Selective Laser Melting (SLM) je aditivní technologií, která umožňuje výrobu dílů s komplexní geometrií a vnitřní sktrukturou. Mechanické vlastnosti vyráběných dílů jsou srovnatelné s konvenčně obráběnými díly. Technologie SLM umožňuje zpracování velkého množství materiálů jako například nerezové oceli, slitiny kobaltu a chromu, titanové slitiny, hliníkové slitiny a keramiky. Největší uplatnění nachází tato metoda výroby především ve výrobě prototypů, leteckém, kosmickém a lékařském průmyslu.

Vstupní data tvoří 3D-CAD model, který je softwarově rozložen na jednotlivé vrstvy a přeposlán do výrobního stroje. Model si s sebou nese informace ohledně procesních parametrů a geometrii drah laserů jednotlivých vrstev.

Stavba dílu začíná nanášením první vrstvy prášku o tloušťce 20 až 100 μm na stavební platformu. Druhým krokem je roztavení prášku laserem v požadovaných místech a vytvoření první vrstvy součásti. Následuje sesunutí stavební platformy o tloušťku vrstvy prášku a nanášení nové vrstvy prášku. Tento postup (obr. 1-1) se opakuje až do dokončení celé stavby, kdy je také odstraněn přebytečný prášek [1]. Celý proces probíhá v inertní atmosféře argonu nebo dusíku.



Obrázek 1-1 Zjednodušené schéma procesu stavby [1]

Hlavním problémem výroby komponent pomocí technologie SLM jsou strmé teplotní gradienty a s nimi související zbytková napětí. V důsledku rychlého ohřátí materiálu a pomalému vedení tepla dochází ke vzniku strmých teplotních gradientů. Předehřev prokazatelně snižuje výskyt zbytkových napětí a mimo jiné má také pozitivní vliv na omezení tvorby trhlin [2].

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

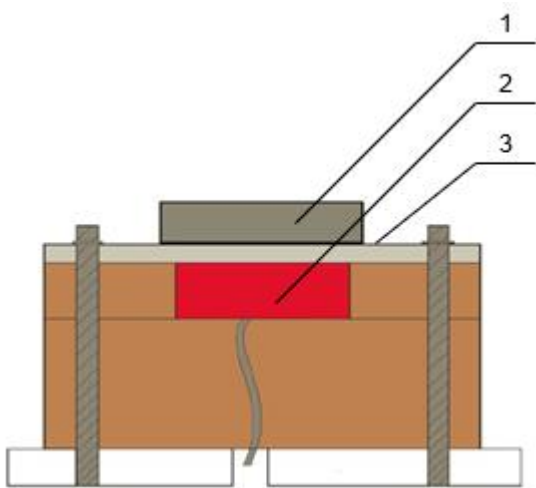
2.1 Možnosti předehřevu

Problematice předehřevu se věnuje velké množství článků a patentů. Mezi nejběžnější způsob předehřevu patří předehřev samotné stavební platformy. Tuto možnost nabízí i tiskárna 280HL od společnosti SLM Solutions, která je předmětem mé práce, a to do teploty 200 °C. Dalšími častými metodami jsou předehřev prášku před nanášením, předehřev prostoru stavební komory a předehřev prášku pomocí přídavného laseru.

2.1.1 Předehřev stavební plochy

Předehřev stavební platformy je nejčastějším způsobem předehřevu technologie SLM. Jedná se o konstrukčně nejjednodušší možnost předehřevu.

K. Kempen [2] využila ke svému experimentu modul předehřevu stavební plochy, který byl instalován na zařízení Concept Laser M3. Samotné topné zařízení (obr. 2-1 2) je pod stavební plochou (obr. 2-1 3), na které je usazena stavební deska (obr. 2-1 1). Topný element je opatřen izolací, která brání šíření tepla do ostatních částí stroje. Teplota stavební desky je kontrolována s přesností ± 2 °C.



Obrázek 2-1 Schéma modulu předehřevu stavební desky [2]

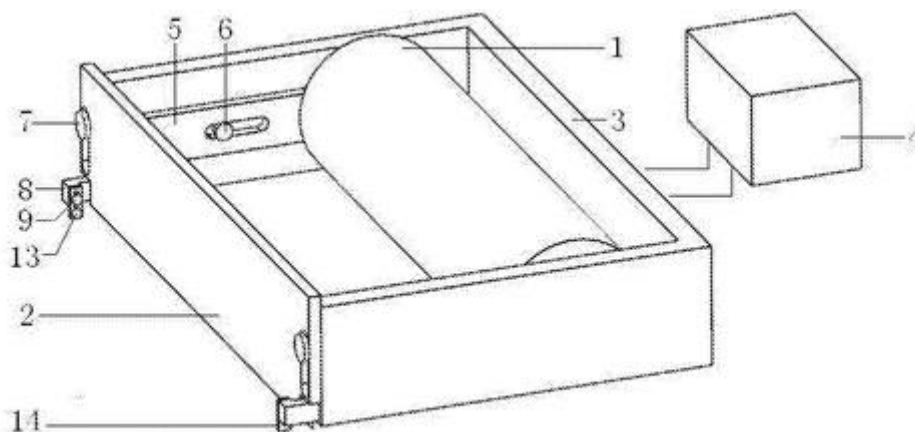
Koncept předehřevu stavební desky je sice jednoduchý na realizaci, avšak s rostoucí výškou tisknutého dílu dochází ke značným rozdílům teplot mezi danými vrstvami [1]. Nejvíce patrný je rozdíl teploty nejnovější vrstvy a požadované teploty předehřevu. Dalším problémem je také nanášení relativně studeného prášku o pokojové teplotě na přehřátou platformu.

2.1.2 Nanášení pomocí válečku s předehřevem

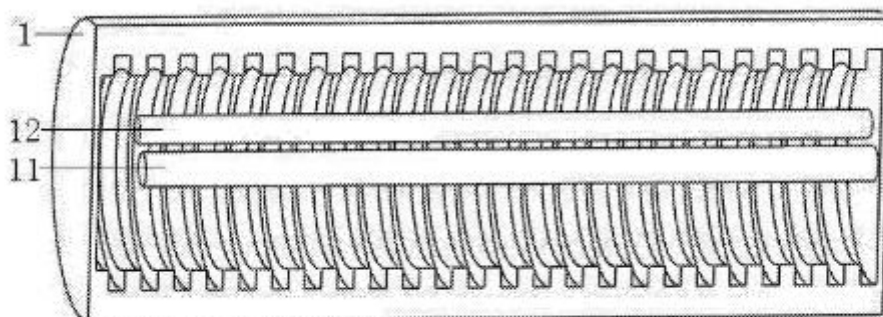
Netradičnímu způsobu předehřevu se věnoval P. Bai [3]. Jeho vynález představuje jednoduchý způsob předehřevu prášku během nanášení. Nanášecí zařízení představené v jeho patentu se skládá ze 2 hlavních částí: ocelové stěrky (obr. 2-2 2) a ocelového válečku (obr. 2-2 1).

Váleček je pomocí topné patrony vyhříván na požadovanou teplotu předehřevu a během nanášení prášku dochází k přenosu tepla z válečku na vrstvu prášku a tím dochází k předehřevu.

Pro váleček o vnějším průměru 15 až 25 mm a vnitřním průměru 10 až 20 mm je možno použít jeden z následujících materiálů: rychlořezná ocel H13 17Ni12Mo2202, 1Cr18Ni9304, 0Cr19Ni9304L, W6Mo5Cr4V2 a jiné. Stěrka je vyrobena z rychlořezné oceli. Zařízení je také opatřeno systémem na snímání nerovnosti povrchu, které je tvořeno infračerveným emitorem (obr. 2-2 13) a snímačem (obr. 2-2 14). Informace jsou posílány do řídicího centra (obr. 2-2 4). Předehřev je zajištěn pomocí topné patrony (obr. 2-3 11). Předehřev i systém měření teploty (obr. 2-3 12) jsou umístěny uvnitř válečku.



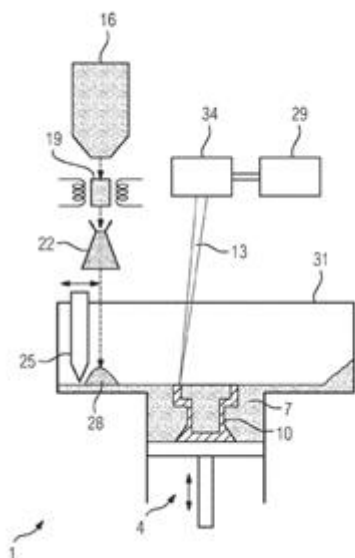
Obrázek 2-2 Schéma nanášecího zařízení využívající váleček [3]



Obrázek 2-3 Řež válečkem [3]

2.1.3 Předehřev prášku před nanášením

Problém týkající se rozdílných teplot první a nejnovější vrstvy řeší předehřev prášku před nanášením. Touto problematikou se ve svém patentu zabýval C. Brunhuber [4]. V kombinaci autorova řešení společně s využitím předehřevu stavební platformy dochází také k odstranění problému souvisejícího s rozdílem teplot mezi práškem a platformou.



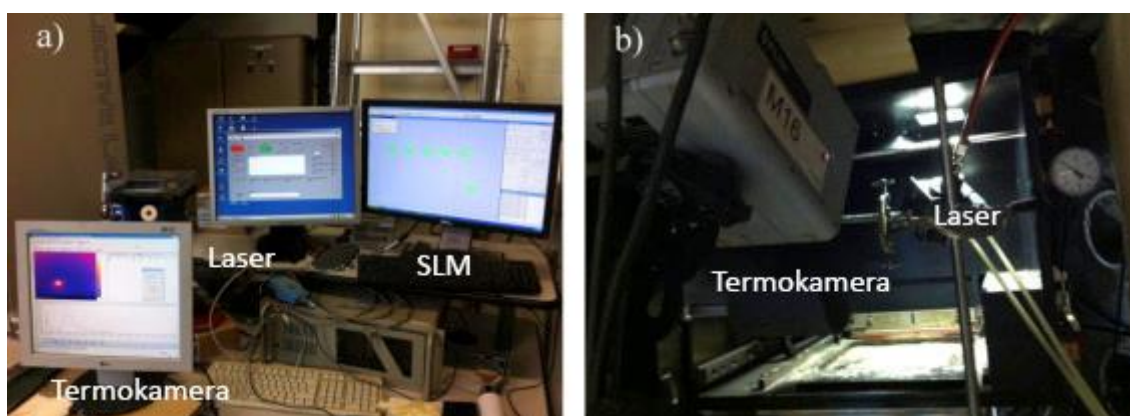
Obrázek 2-4 Schéma vynálezu pro předehřev prášku před nanášením [4]

Množství prášku potřebné na jednu vrstvu stavby je ze zásobníku prášku (obr. 2-4 16) odměřeno do malé komory předehřevu (obr. 2-4 19). Prášek je poté v komoře zahříván na požadovanou teplotu. Následuje rovnoměrné nanášení prášku pomocí rozdělovače prášku (obr. 5-22) do stavební komory (obr. 2-4 31) a rozetření pomocí keramické stěrky (obr. 2-4 25). Proces stavby pokračuje standartně. Autor dále navrhuje mnohá vylepšení jako je například vyhřívání zásobníku prášku a stavební komory. Komora předehřevu a rozdělovač prášku je také možné navrhnout jako jednu součást.

Hlavními výhodami je úspora energie a času, díky vyhřívání menšího prostoru v porovnání s předehřevem celé stavební komory, přesná kontrola teploty předehřevu a možnost aplikace této metody na velké množství materiálů. V případě vysokých teplot předehřevu, například u slitin na bázi niklu, může docházet k prudkému ochlazení první vrstvy a vzniku velkých teplotních gradientů, v krajních případech i ke spékání prášku už v komoře předehřevu.

2.1.4 Předehřev prášku laserem

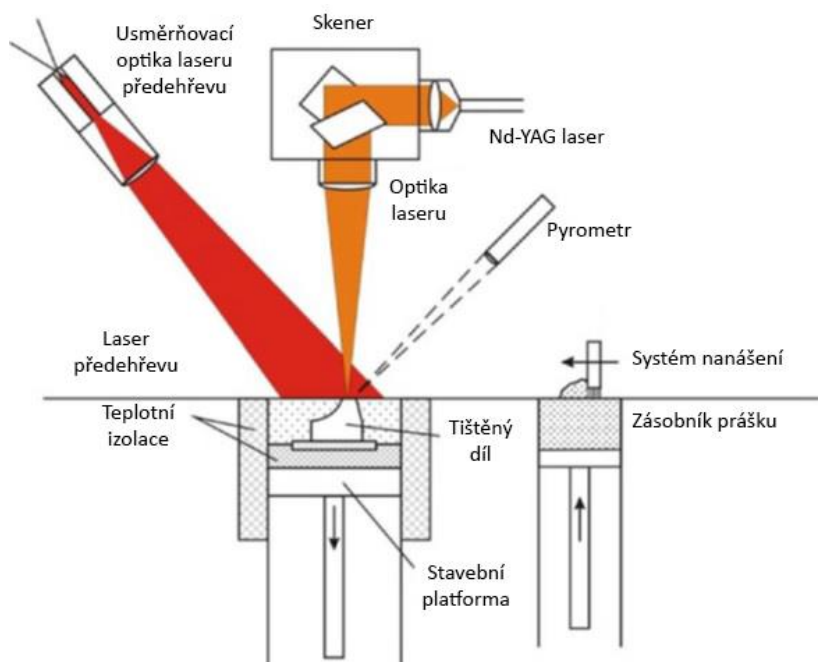
Q. Liu [5] ve svém experimentu při tisku keramických dílů využil předehřevu pomocí přídavného laseru. Prášek byl před stavbou vysušen v peci při teplotě 80 °C po dobu dvou hodin. Předehřev byl zajištěn pomocí vysokovýkonného laseru Nd-YAG (obr. 2-5 b). Autor prováděl sérii experimentů s různými teplotami předehřevu a to 1 500 °C, 2 000 °C a 2 500 °C. Teplota povrchu je monitorována termokamerou (obr. 2-5 b). Parametry laseru, teplota předehřevu a parametry stavby jsou monitorovány (obr. 2-5 a) Při teplotách předehřevu 2 000 °C a 2 500 °C dochází při samotném tavení prášku ke zvýšení teplot pouze o zhruba 100 °C.



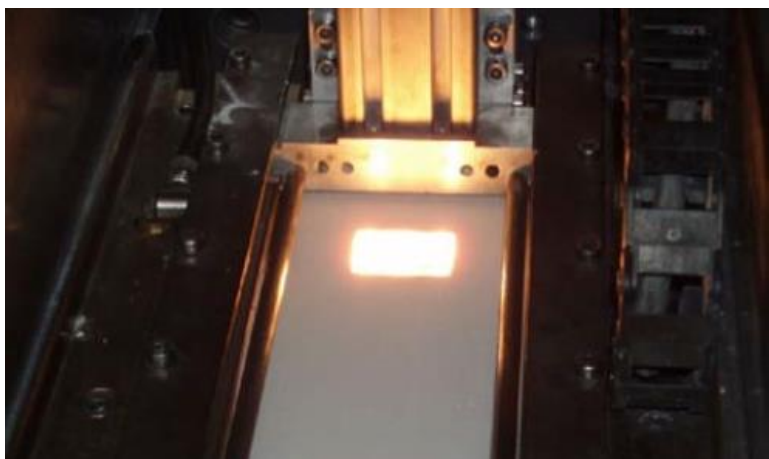
Obrázek 2-5 Předehřev za pomoci laseru Nd-YAG, a) monitorovací a řídicí centrum, b) stavební komora [5]

Tento způsob výroby má dva zásadní kroky. Prvním krokem je předehřev. Při takto vysokých teplotách předehřevu dochází k částečnému natavení prášku ještě před samotným skenováním. Výhodou částečného natavení prášku pomocí předehřevu je snížení možnosti vzniku plasmu, která je v procesu nežádoucí. Druhým krokem je proces skenování. Díky velmi vysoké teplotě předehřevu je prášek předehřán na teplotu blízkou teplotě tavení a tím je stavba dokončena s nízkou spotřebou energie skenovacího laseru.

Předehřev pomocí laseru uplatnil ve svém výzkumu také J. Wilkes [6]. Ve své práci se zabývá způsobem zpracování keramiky pomocí technologie SLM. Prášek je předehříván laserem na bázi CO₂ s maximálním výkonem až 1 000 W (obr 2-6). Laser je opticky usměrňován na povrch stavební plochy do obdélníkového tvaru o rozměrech 20 mm x 30 mm (obr. 2-7). Teplotní izolace zajišťuje homogenní teplotu tisknutého dílu během stavby. Teplota je měřena pyrometrem. Nanášení prášku je zajištěno zařízením, které využívá pro rovnoměrné rozetření vrstvy stěrky z uhlíkových vláken.

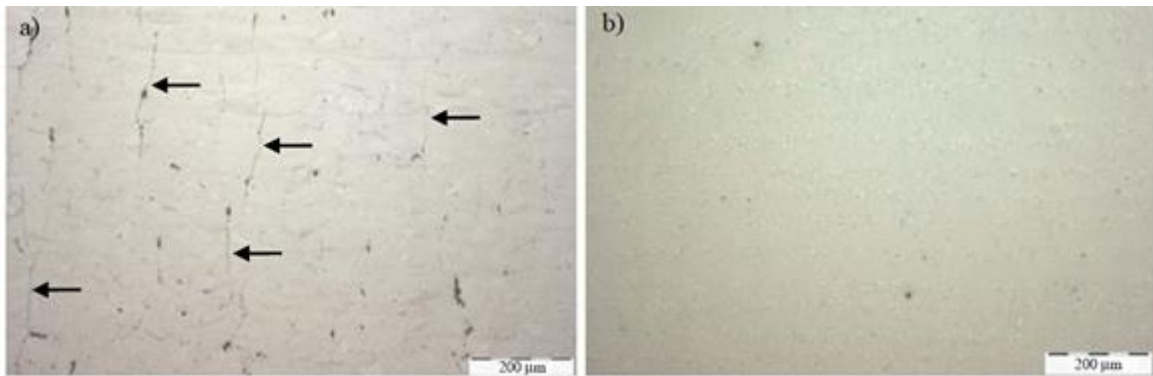


Obrázek 2-6 Schéma zařízení přehřevu laserem [6]



Obrázek 2-7 Laserem vyhřívána oblast před skenováním [6]

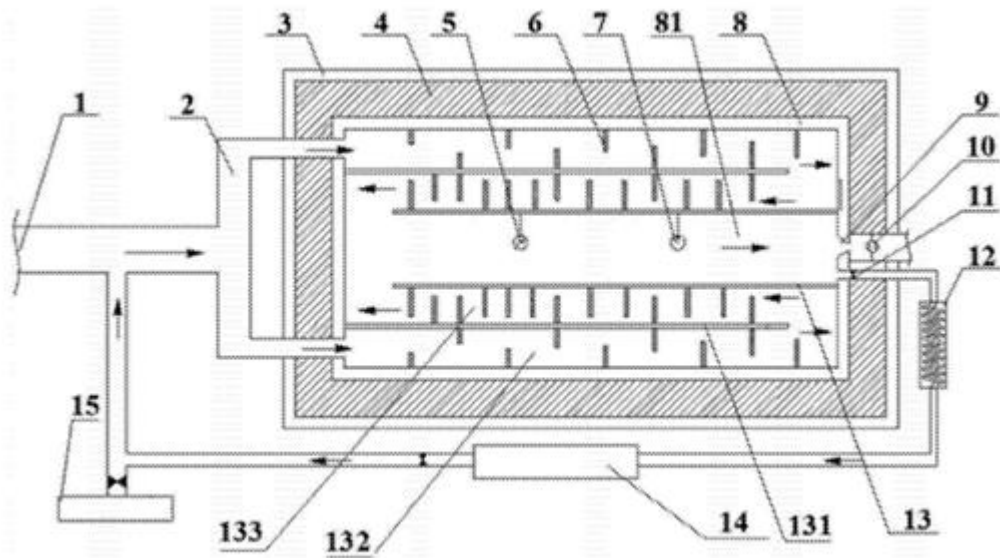
Díky přehřevu na teplotu 1 600 °C bylo dosaženo téměř 100% hustoty tisknutých keramických dílů ze směsi prášků ZrO_2/Al_2O_3 . Přehřev prášku před tavením má také zásadní vliv na tvorbu trhlin v materiálu. Pro srovnání byly vytištěny dva vzorky, jeden bez využití přehřevu a druhý s využitím přehřevu o teplotě 1 715 °C (obr. 2-8).



Obrázek 2-8 Struktura vytištěných dílů, a) bez předehřevu, b) s předehřevem o teplotě 1 715 °C [6]

2.1.5 Předehřev ochranné atmosféry

Předehřevem ochranné atmosféry se zabýval Y. Bai [7]. Ke snížení vysokých teplotních rozdílů využívá předehřevu ochranné atmosféry současně s předehřevem stavební plochy.

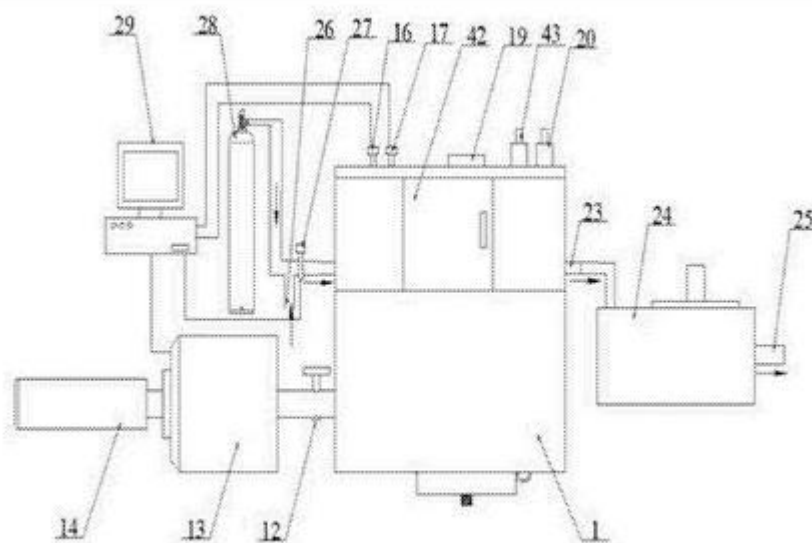


Obrázek 2-9 Schéma zařízení pro předehřev ochranné atmosféry [7]

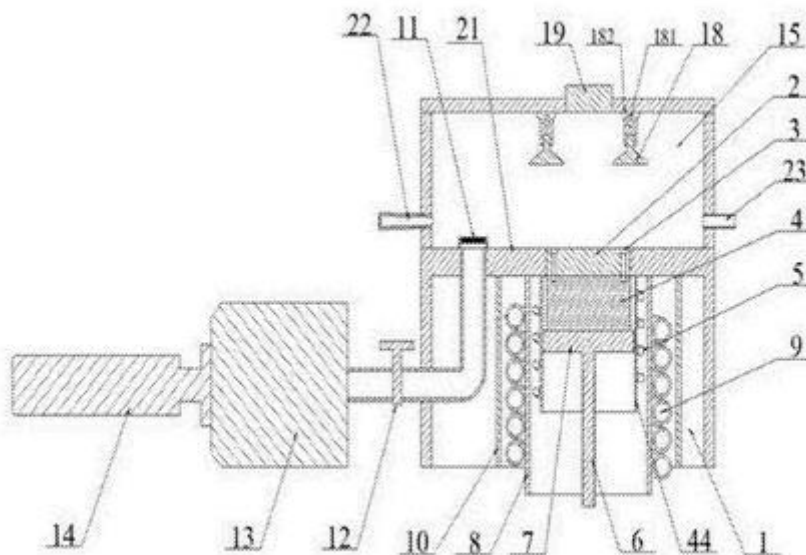
Komora předehřevu (obr. 2-9 81) je pomocí oddělovacích desek (obr. 2-9 131) rozdělena na dvě pasáže. Předehřev je zajištěn topnými sloupky (obr. 10-6), které jsou umístěny kolmo ke směru proudění plynu. Plyn je ještě před samotným předehřevem vedený děličkou (obr. 2-9 2) do příslušných pasáží. Jako první dochází k předběžnému předehřevu v první pasáži (obr. 2-9 132), hustota rozložení topných těles je patrně nižší než v druhé pasáži (obr. 2-9 133). Ke kontrole tlaku a teploty slouží senzory (obr. 2-9 5, 2-9 7). Do stroje vstupuje již předehřátá atmosféra ventilem (obr. 2-9 9). V případě překročení povoleného tlaku dochází k uvolnění redukčního ventilu (obr. 2-9 11) a odvodu plynu do vodou chlazené trubky (obr. 2-9 12). Ochlazený plyn je skladován v zásobní lahvi (obr. 2-9 14) a připraven pro nové použití. Celé zařízení je také opatřeno ochranným obalem (obr. 2-9 3) a izolací (obr. 2-9 4)

2.1.6 Předehřev prostoru stavební komory

Komplexnější řešení, kombinující jak předehřev ochranné atmosféry tak i předehřev prášku optikou, navrhl J. Guan [8]. Objektem jeho práce je multifunkční SLM zařízení, které se skládá ze 4 modulů. Tyto moduly zajišťují předehřev inertní atmosféry a naneseného prášku.



Obrázek 2-10 Schéma multifunkčního SLM zařízení [8]



Obrázek 2-11 Řez částí zařízení [8]

Pracovní postup zařízení je následující. V prvním kroku dochází k vytvoření vakua, parametry jsou kontrolovány tlakovým senzorem (obr. 2-10 17) a detektorem kyslíku (obr. 2-10 16). Následuje nanesení vrstvy prášku. Dalším krokem je samotný předehřev. Jako první dochází ke spuštění chlazení, které je zajištěno oběhem se studenou vodou (obr. 2-11 9), a spuštění indukční cívky (obr. 2-11 5), která předehřívá stavební desku. Stavební deska a píšť jsou chráněny izolační vrstvou. Po nahřátí stavební desky dochází k zapnutí infračervené lampy, která ohřívá povrch prášku. Teplota prášku je kontrolována senzorem a okamžitá teplota je ukázána na displeji (obr. 2-10 43). Následuje vpuštění inertní atmosféry, která je skladována v zásobníku (obr. 2-11 28), vstupním ventilem (obr. 2-11 22) do stavebního prostoru (obr. 2-11 15). Posledním krokem stavby je vypálení průřezu dílu v dané vrstvě. Stavební platforma se sesune o výšku vrstvy a nanese se nová vrstva prášku. Stavba pak pokračuje standartně. Celý proces je řízen PLC ovladačem (obr. 2-11 29).

2.2 Nanášení prášku

Nanesením prášku začíná celý proces výroby dílů technologií SLM. Tento proces mají na starosti nanášecí zařízení – recoatery. Klasický recoater se skládá ze zásobníku prášku, systému dávkování a stěrky.

Prvním krokem je odměření dávky prášku potřebné na jednu vrstvu stavby. Následuje roztření prášku stěrkou na rovnoměrnou vrstvu, zpravidla o tloušťce 20 až 100 μm . Stěrky mohou být různých druhů a materiálů. Nejběžnější jsou stěrky silikonové a pevné, většinou ocelové nebo keramické. Další možností je také stěrka s pružnými elementy, například tvořená jemnými drátky.

Konstrukční řešení nanášecích zařízení se liší. Nejběžnější varianty jsou zařízení, která tvoří jeden celek, jako například nanášecí systém tiskárny SLM 280HL, a zařízení které netvoří jeden celek. Častým řešením, kdy celý systém netvoří jeden celek, je umístění zásobníku prášku a dávkovacího zařízení mimo stavební prostor. Ve stavebním prostoru pak operuje pouze pohyblivá stěrka. Tohoto systému využil při svém experimentu například J. Wilkes [6].

Nanášecí systém tiskárny SLM 280HL (obr. 2-12) je koncipován do jedné sestavy. Je vybaven zásobníkem prášku, systémem dávkování a silikonovou stěrkou. Zařízení je navrženo pro práci při předehřevu stavební desky do 200 °C.

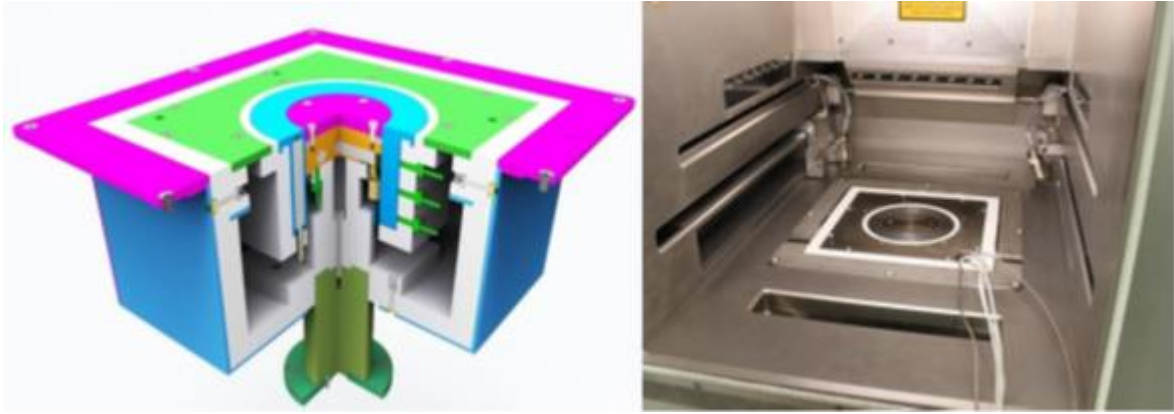


Obrázek 2-12 Recoater tiskárny SLM 280HL během stavby

Zásobník prášku je průběžně během stavby automaticky doplňován v zadní části stavební komory. Systém dávkování tvoří dva hřídele s drážkami, které během rotace dávkují prášek potřebný na stavbu jedné vrstvy. Celý systém dávkování je přes šnekové soukolí poháněn krokovým elektromotorem BRS364HS0001 od společnosti Schneider Electric o kroučícím momentu 0,45 Nm.

2.3 Řešení předehřevu na stávajícím zařízení

Výrobou komory pro zvýšení standardní teploty pro tiskárnu SLM 280HL se zabýval ve své diplomové práci M. Malý [9]. Tato komora je navržena pro předehřev do teplot až 600°C. Komora se vkládá do procesního prostoru tiskárny (obr. 2-13).

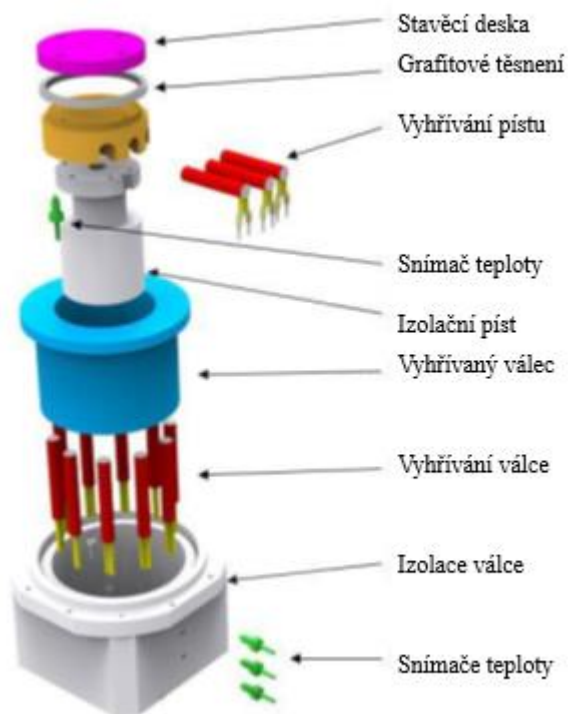


Obrázek 2-13 Model experimentální komory a její umístění do prostoru tiskárny [9]

Díly vystavené vysokým teplotám jsou zkonstruovány ze žáruvzdorné niklové slitiny Inconel Alloy 718, která dokáže dlouhodobě odolávat teplotám do 700 °C. Pro ostatní ocelové součásti byla zvolena korozivzdorná ocel 1.4301. Izolace byla zajištěna technickou bezazbestovou keramikou Duratec 750 a Monalite M1.

Přehřev je zajištěn topnými patronami (obr. 2-14). Tři patrony o celkovém výkonu 600 W byly využity na ohřev pístu a deset patron o celkovém výkonu 1 000 W bylo využito na ohřev válce.

Pro nanášení prášku bylo využito stávajícího nanášecího zařízení tiskárny SLM 280HL. Silikonová stěrka byla z důsledku vysokých teplot přehřevu nahrazena stěrkou z korozivzdorné oceli 1.4301.



Obrázek 2-14 Systém vyhřívání [9]

Hlavním nedostatkem celého zařízení je způsob nanášení prášku. Stávající zařízení pro nanášení prášku není stavěno do vysokých teplot. I po nahrazení silikonové stěrky je použití tohoto nanášeče suboptimální. Další komplikací v souvislosti s tiskem tenkostěnných dílů je využití pevné stěrky. Může docházet k mechanickému poškození dílů během stavby vlivem nárazů stěrky o nerovnosti povrchu.

V mé práci se zabývám úpravou stávajícího zařízení a konstrukci vlastního nanášecího zařízení opatřeného předeřevem. Tato práce navazuje na práci mého vedoucího a doplňuje ji o konstrukci nanášecího zařízení.

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Předehřev prášku prokazatelně zlepšuje mechanické vlastnosti vyráběných dílů. Výrazně v nich také snižuje zbytková napětí a omezuje vznik trhlin. Teplota předehřevu má také vliv na tvrdost tištěných vzorků.[2]

Pozitivní výsledky prokazuje již předehřev stavební platformy, jedná se o konstrukčně jednoduchou variantu předehřevu. Zásadním nedostatkem této formy předehřevu je rozdíl teplot mezi jednotlivými vrstvami tištěného dílu [2]. Výrazný je rozdíl zejména mezi první a nejnovější vrstvou. Vysoké teplotní rozdíly mají za následek deformace dílu [1].

Předehřev pomocí vyhřívaného válečku je dalším jednoduchým řešením předehřevu. Hlavní nevýhodou je doba stavby. Váleček vyhřívá jednotlivě každou vrstvu a tím značně navyšuje čas stavby [3].

Díky kombinaci metod předehřevu stavební platformy a předehřevu prášku před nanášením dochází k odstranění hned dvou problémů, které představuje předehřev stavební platformy. Teplotní rozdíly jednotlivých vrstev již nejsou tak výrazné a dochází také k odstranění problémů, které souvisí s nanášením studeného prášku na vyhřívanou platformu. Velkým omezením předehřevu prášku před nanášením, ať už v zásobníku nebo recoateru, je však teplota předehřevu. Problémem je spékání prášku, vlivem velmi vysokých teplot, ještě před nanesením [4].

K dosažení vhodných podmínek k tisku materiálů z keramiky je zapotřebí dosáhnout teplot předehřevu 1 600 °C až 2 500 °C [5]. Takto vysoké teploty předehřevu lze dosáhnout pomocí přídavného vysokovýkonného laseru. Ačkoliv předehřev pomocí laseru dosahuje velmi vysokých teplot, a s vhodným využitím izolace také homogenní rozložení teploty v tištěném díle, komplikací je požadavek na dostatečně prostornou komoru. Tato varianta předehřevu je ovšem finančně velmi náročná [6].

Prostorově nenáročné, v ohledu na prostor stavební komory, jsou pak systémy předehřevu ochranné atmosféry. Ačkoliv se jedná o komplikovaná a mnohdy prostorná zařízení, je možné je umístit externě mimo prostor komory. Předehřev inertní atmosféry napomáhá k udržení homogenního rozložení teploty v dílu během stavby.

Mimo metodu předehřevu je také nutné zvážit způsob nanášení prášku. Stávající řešení pracující s pružnou silikonovou stěrku je univerzální. Limitující je však pro možnost využití silikonové stěrky teplota předehřevu. Při požadované teplotě předehřevu 400 °C již není možné použít silikonovou stěrku. Pro práci za vyšších teplot jsou vhodné stěrky keramické nebo ocelové. Hlavním problémem při využití například keramické stěrky je však deformace tenkostěnných dílů během stavby vlivem narážení stěrky o nerovnosti dílu. Možné řešení tohoto problému představil ve svém experimentu J. Wilkes [6]. Použití poddajné stěrky z uhlíkových vláken je vhodné jak pro použití do vysokých teplot tak i šetrné pro tisk tenkostěnných dílů.

Vhodným řešením pro tiskárnu SLM 280HL se jeví kombinace hned několika metod. Pro požadovanou teplotu předehřevu 400 °C se nabízí možnost kombinovat již navrženou komoru předehřevu s předehřevem prášku před nanášením. Přidáním možnosti předehřevu před nanášením dojde také k odstranění problémů souvisejících s nanášením studeného prášku na předehřátou stavební platformu.

3.2 Cíle práce

Cílem práce je návrh úprav stávajícího zařízení a konstrukční návrh vlastního nanášecího zařízení s předehřevem pro tiskárnu SLM 280HL. Požadovaná teplota předehřevu je 400 °C.

Dílčí cíle práce:

- identifikace návrhových limitů: konstrukční materiály, rozměry atd.,
- úprava stávajícího zařízení pro práci za zvýšených teplot,
- vlastní návrh nového zařízení

4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

4.1 Návrh úprav stávajícího zařízení

Hlavním bodem návrhů úprav je způsob roztírání prášku. Ačkoliv je silikonová stěrka univerzální co se týče geometrie tisknutých dílů, není schopná pracovat za vyšších teplot. Je proto nutné, navrhnout stěrku novou, která splňuje požadavky spojené s prací při využití předehřevu do 400 °C. Tento koncept je limitován tím, že není vhodné až příliš zasahovat do konstrukce nanášecího zařízení.

4.1.1 Pevná stěrka

První, již ověřenou, možností je využití pevné stěrky. Keramické stěrky (obr 4-1) odolávají i velmi vysokým teplotám předehřevu. S pevnou keramickou stěrkou pracuje také novější model 3D tiskárny od společnosti Solutions SLM 500HL. Mimo keramické stěrky lze využít také stěrky z korozi vzdorných ocelí.



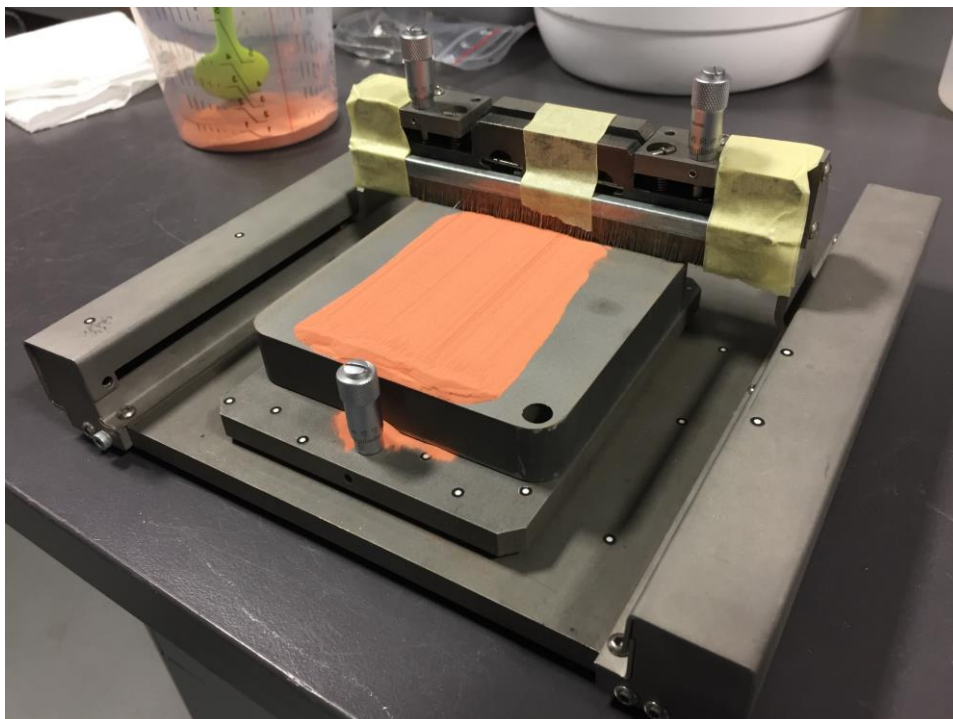
Obrázek 4-1 Keramická stěrka

Nevýhodou tohoto konceptu je možnost poškození dílů během stavby. Vlivem nárazů stěrky o nerovnosti dílu může dojít k deformaci tenkostěnných dílů.

4.1.2 Poddajná stěrka

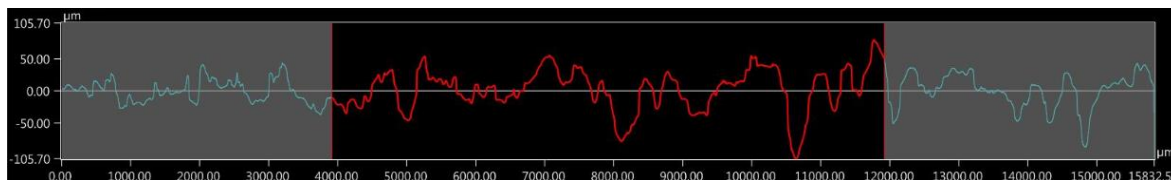
Další variantou je využití poddajné drátkové stěrky. Hlavní výhodou tohoto řešení je šetrnost vůči tenkostěnným dílům. Vhodnou volbou materiálu je také možné pokrýt požadovaný teplotní rozsah přehřevu do 400 °C. Pro test byla navržena drátková stěrka z měděných drátků.

Byl proveden test nanášení prášku mědi drátkovou stěrkou (obr. 4-2). Test spočívá v ručním nanesení prášku a jeho rozetření. Následovala kontrola profilu nanesené vrstvy. Ke kontrole profilu bylo využito 3D optického mikroskopu Keyence VHX 6000. Profil byl naskenován a zkoumán v pěti různých rovinách. Cílem bylo zjistit, zda je možné využít tento druh stěrky.



Obrázek 4-2 Zařízení pro test nanášení

Test nanášení ukázal, že drátkovou stěrku není možné využít. Nerovnoměrné zastřižení drátků, i přes zarovnání pomocí elektro-erozivního obrábění, má za následek tvorbu rýh v naneseném profilu (obr. 4-3). Výsledné odchylky od požadované tloušťky profilu přesahují hodnotu 50 μm a v mezních případech i 100 μm .



Obrázek 4-3 Profil nanesené vrstvy

Stávající zařízení bylo upraveno nahrazením stěrky. Silikonová stěrka byla nahrazena stěrkou keramickou, která umožňuje využití vyšších teplot předehřevu.

4.2 Návrh vlastního zařízení

Další možností je návrh vlastního zařízení (obr. 4-4). Návrh vlastního zařízení umožňuje větší rozsah úprav. Zařízení pracuje na obdobném principu jako současné zařízení. Hlavní výhodou konstrukce nového zařízení je implementace předehřevu.

Předehřev je zajištěn pomocí topných patron. S tím vzniká nový problém a to šíření tepla sestavou. Šíření tepla omezuje izolace, která obklopuje celou vnitřní část zařízení, která je vystavená vysokým teplotám.

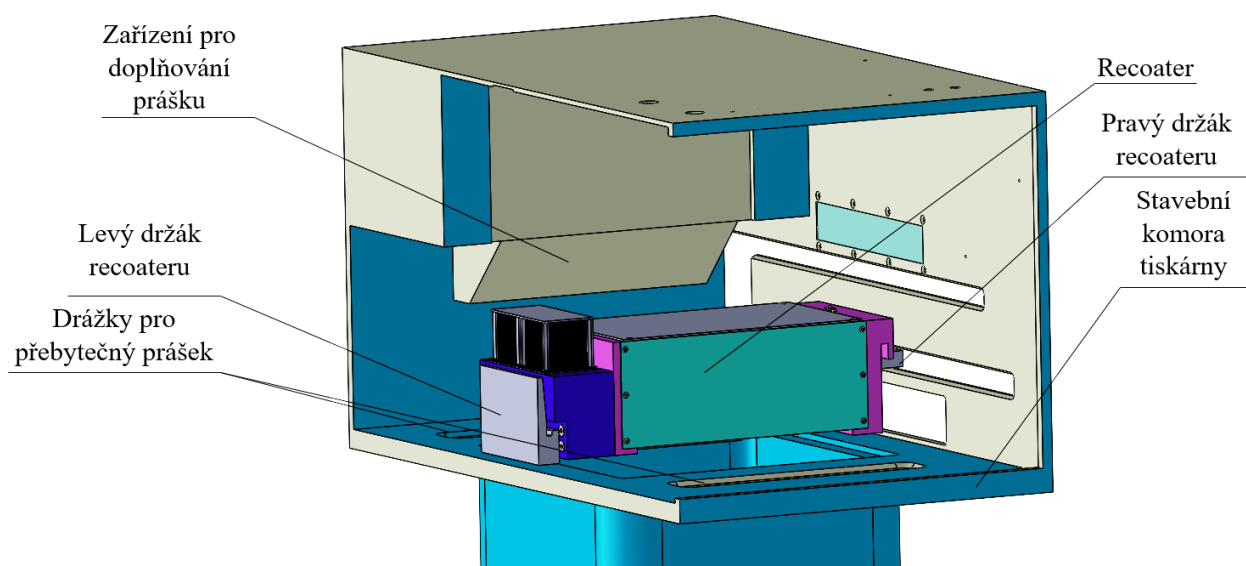
Díky předehřevu prášku ještě před nanášením je možné dosáhnout lepších parametrů tisknutých dílů. S vyšší teplotou předehřevu se naskytuje také možnost využívat nové materiály, které pro dosažení optimálních parametrů předehřev vyžadují.

Toto řešení je blíže popsáno v konstrukčním řešení práce.

5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

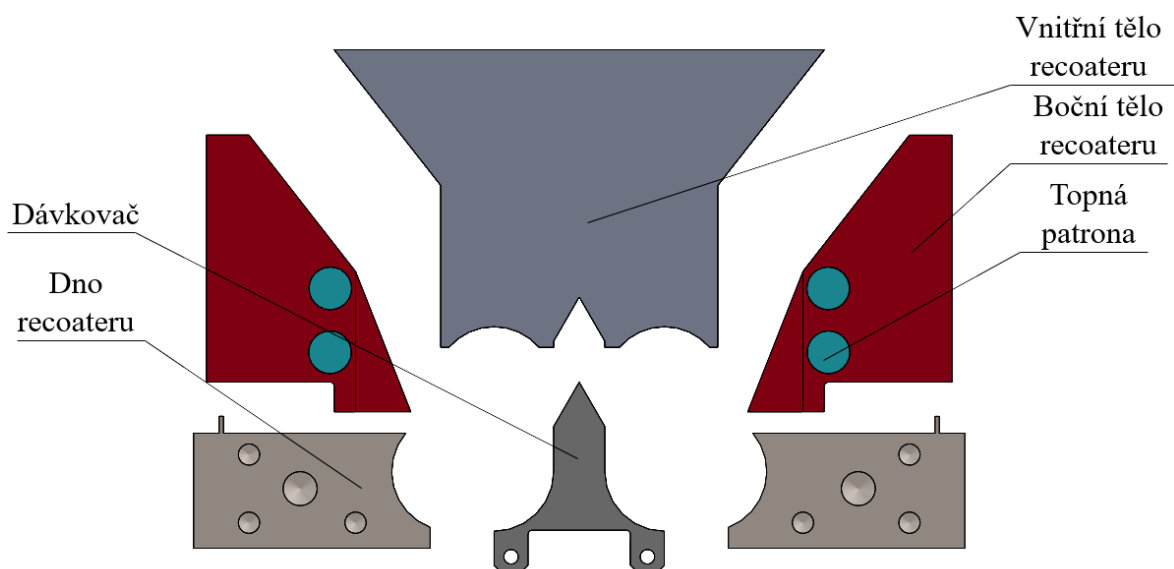
Hlavním úkolem zařízení je distribuce prášku potřebného na stavbu jednotlivých vrstev a jeho rovnoměrné rozetření podél stavební platformy. Celé zařízení se skládá z několika částí: vnitřní část, izolace, systému nanášení, bočních dílů a krycích plechů.

Pohyb potřebný pro nanesení prášku je zajištěn pomocí držáků recoateru (obr. 5-1), které jsou součástí tiskárny. *Boční kryty recoateru* jsou opatřeny patkami, které zapadají do drážek *držáků recoateru*. Přebytečný prášek je ze stavebního prostoru odváděn pomocí *drážek* v konstrukci komory tiskárny.



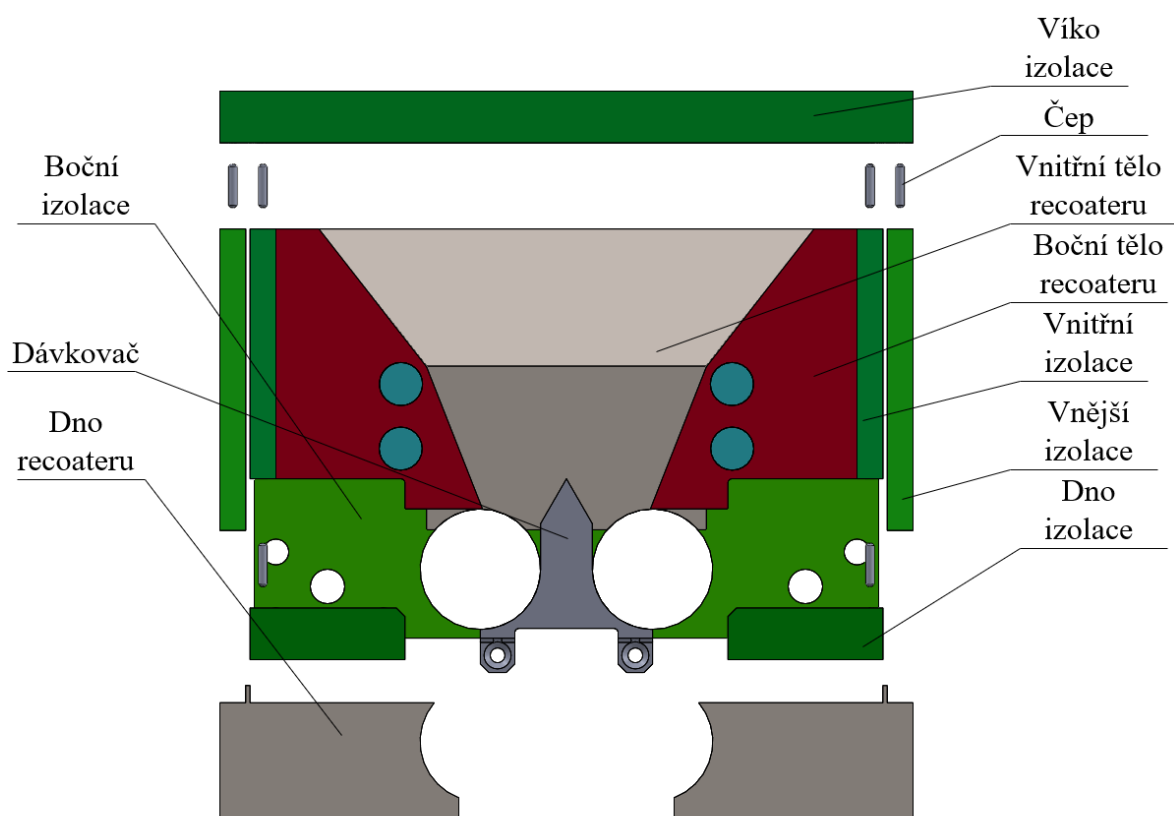
Obrázek 5-1 Uložení recoateru do prostoru tiskárny

Nejdůležitější částí je vnitřní část zařízení (obr. 5-2). V této části je skladován prášek a dochází k jeho předehřevu. *Topné patrony*, které zajišťují předehřev jsou vkládány do *bočních těl recoateru*, jedná se o jediné přímo vyhřívané díly v celé sestavě. *Vnitřní těla recoateru* usměřují prášek do oblasti předehřevu s nejvyšší teplotou.

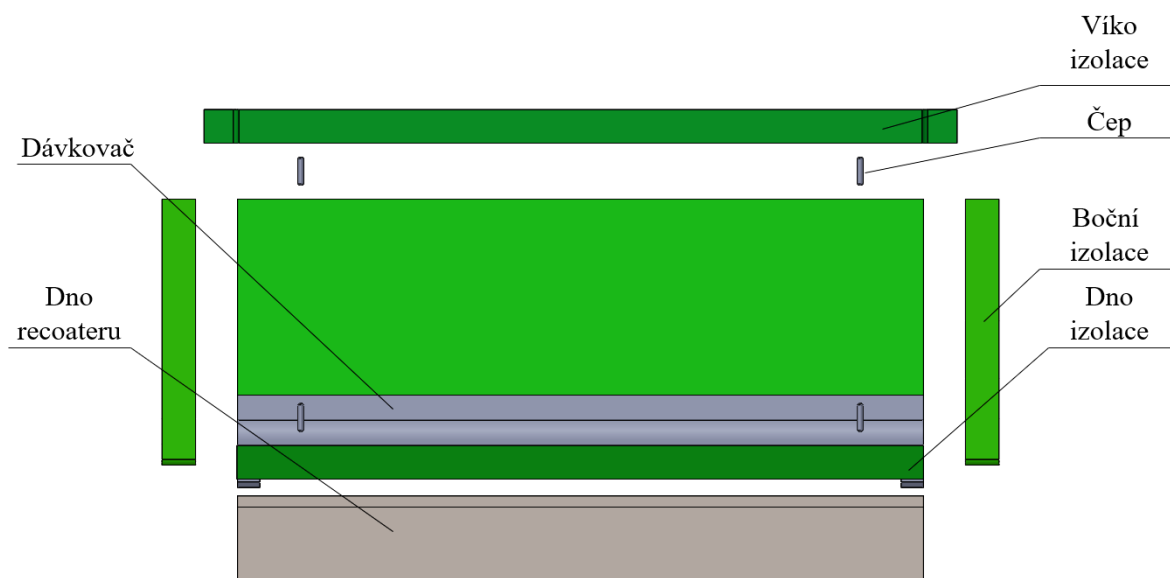


Obrázek 5-2 Rozložený pohled na vnitřní části z boku

Vnitřní část je od zbytku sestavy oddělena vrstvou izolace. Hlavním cílem izolace je omezení šíření tepla celou soustavou do stroje. Poloha izolačních desek je zajištěna pomocí *čepů* (obr. 5-4, 5-5), které brání pohybům izolace během stavby.

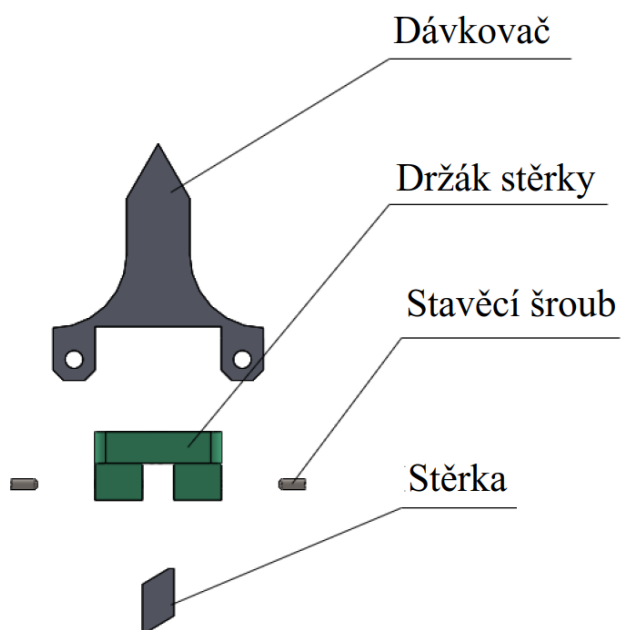


Obrázek 5-3 Řez rozloženým pohledem vnitřní částí s izolací z boku



Obrázek 5-4 Rozložený pohled celé konstrukce izolace

Dávkování prášku je zajištěno soustavou hřidelů, celý systém nanášení je blíže popsán v kapitole 5.3. K roztírání prášku je využito keramické stěrky, které je pomocí stavěcích šroubů pevně zchycena do *držáku stěrky* (obr. 5-6).

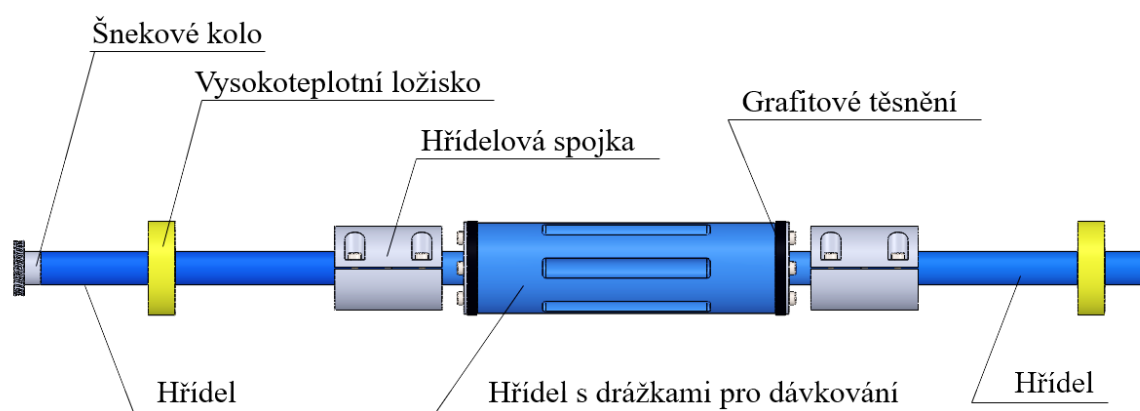


Obrázek 5-5 Rozložený pohled uchopení stěrky

5.1 Systém nanášení

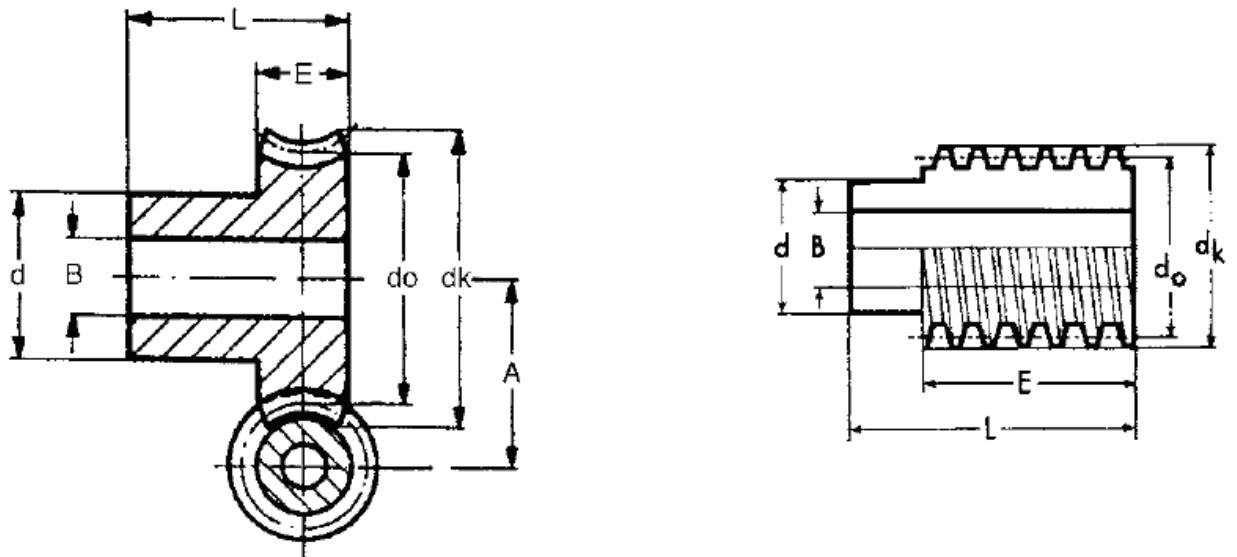
5.1.1 Systém dávkování

Pro dávkování byla navržena soustava hřídelů s drážkami (obr. 5-8), které během rotace dávkuje prášek potřebný na stavbu jedné vrstvy. Hřídele byly oproti původnímu zařízení rozděleny na soustavu tří hřídelů spojených *hřídelovými spojkami* (obr. 27). Tohle opatření snižuje teplotní vodivost celé soustavy a zabraňuje tím tak šíření tepla celou soustavou do motorů. Tyto hřídele jsou usazeny na *vysokoteplotních ložiscích BHTS ZZ 350 °C* (obr. 5-8), která jsou schopná dlouhodobě pracovat při teplotách do 350 °C [18]. *Hřídel s drážkami pro dávkování* (obr. 27) je také opatřena *grafitovým těsněním*, které zabraňuje šíření prášku mimo prostory, které jsou pro něj určeny.



Obrázek 5-6 Model systému dávkování prášku

Celý systém dávkování je přes šnekové soukolí (obr. 5-9) poháněn krokovým elektromotorem BRS364HS0001 od společnosti Schneider Elecrtic o kroutícím momentu 0,45 Nm.



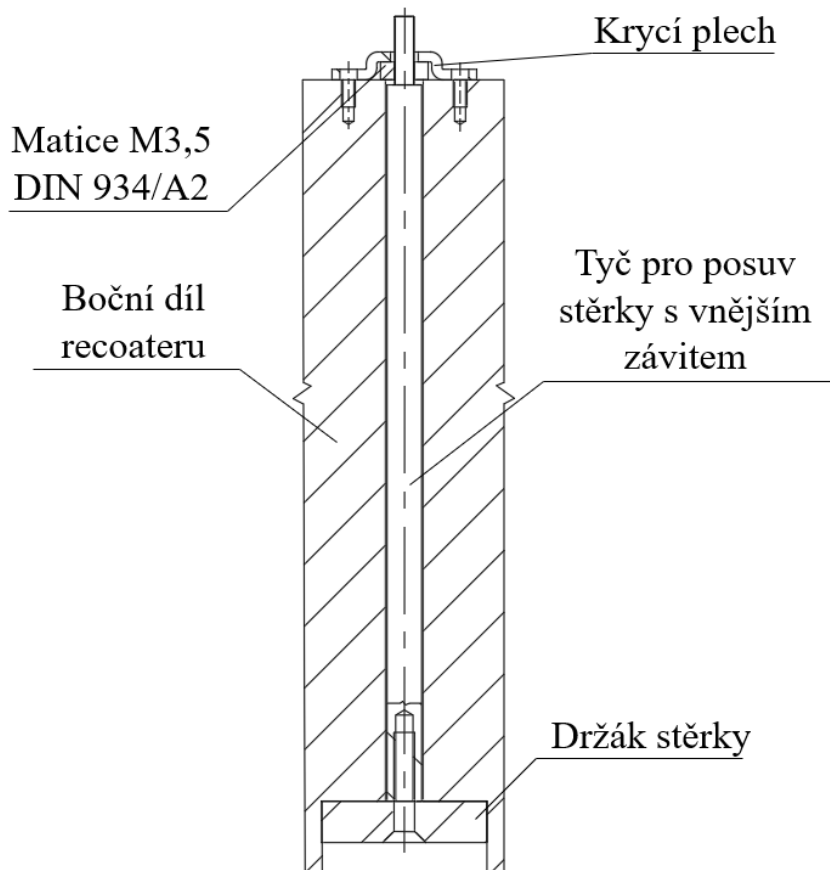
Obrázek 5-7 Schéma šnekového kola (vpravo) a šneku (vlevo)

Tabulka 5-1 Tabulka parametrů ozubení [19]

Parametry ozubení			
		Šnekové kolo	Šnek
Modul	[mm]	0,5	0,5
Počet zubů	-	30	-
B H7	[mm]	4	3
d	[mm]	10	5,5
dk	[mm]	16,5	10
do	[mm]	15	7
L	[mm]	8	16
E	[mm]	3	12
A	[mm]	11	-
Materiál	-	bronz	ETG 100

5.1.2 Systém polohování stěrky

Keramická stěrka je pevně uchycena v držáku stěrky pomocí stavěcích šroubů M2. Držák stěrky je pomocí šroubů M3 uchycen na tyči, které jsou zakončeny závitem M3,5 se stoupáním 0,35 mm. Pomocí matek je pak možno polohovat držák stěrky a tím korigovat tloušťku vrstvy prášku. Tento systém je také opatřen krycím plechem, který slouží jako pojistka proti nadzvedávání stěrky při nárazech na nerovnosti (obr. 5-10).



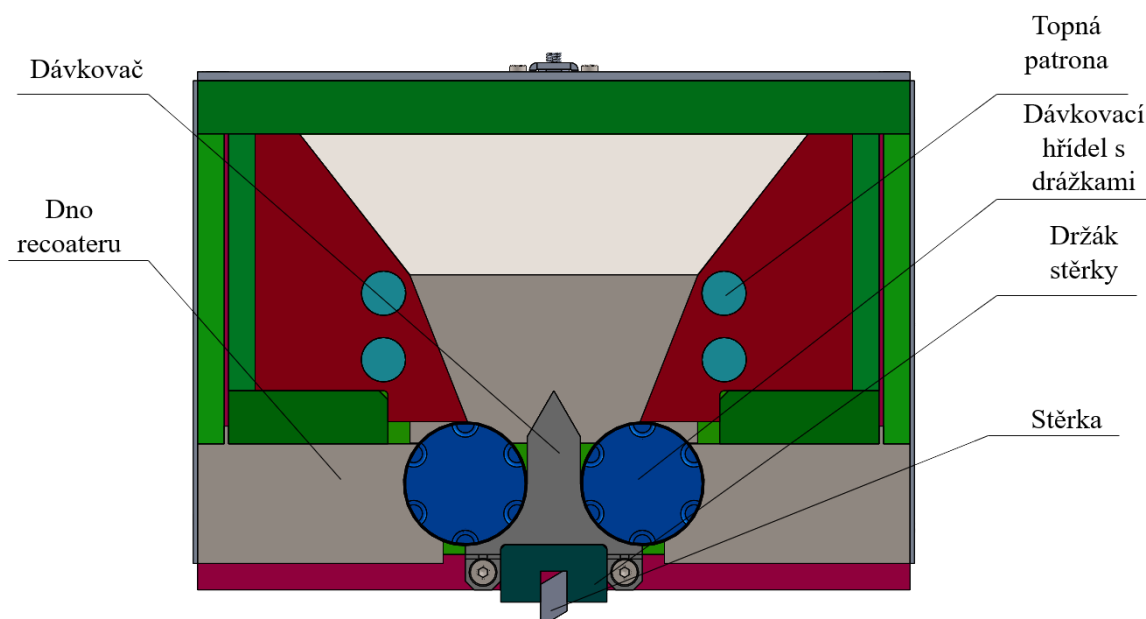
Obrázek 5-8 Schéma posuvu držáku stěrky

5.2 Systém předehřevu

Systém předehřevu musí být schopen zajistit požadovanou teplotu předehřevu 400 °C a nenarušovat chod zařízení během stavby.

5.2.1 Volba topných těles

Pro předehřev bylo využito čtyř topných patron, umístěných v *bočním těle recoateru* (obr. 5-7). Patrony byly zvoleny především pro jejich tvar a rozměr, které jsou vhodné pro mou konstrukci.



Obrázek 5-9 Řez recoaterem

Jedná se o topné patrony s vnitřním napojením vývodů o průměru 10 mm a délce 100 mm s vestavěným termočlánkem. Patrony mají celkový výkon 2 000 W. Patrona je osazena dvěma samostatnými vodiči, které vycházejí z vnitřní části patrony. Vodiče mají sklotextilní izolaci s teplotní odolností 450 °C [17]. Teplota předehřevu je kontrolována vestavěným termočlánkem patrony, aby nedošlo k utavení patron (obr. 5-7).

5.2.2 Návrh topných patron

Topné patrony byly navrženy pro ohřev prášku z pokojové teploty 20 °C na požadovanou teplotu předehřevu 400 °C. Ačkoliv nebyl vznesen požadavek na čas ohřevu, snahou bylo zajistit předehřev prášku na teplotu 400 °C do 30 min. Ve výpočtech byly uvažovány pouze ztráty vedením. Výpočet je založený na kalorimetrické rovnici (rov. 1), která popisuje tepelnou výměnu těles.

$$Q_{12} = c \cdot m \cdot (T_2 - T_1) \quad (1)$$

kde:

Q	[J]	- teplo
m	[kg]	- hmotnost
c	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	- měrná tepelná kapacita
T	[K]	- teplota soustavy

Ohřev zařízení

Následující výpočty slouží k určení času předehřevu recoateru z pokojové teploty na teplotu předehřevu 400 °C. Jedná se o zjednodušené výpočty, které slouží pouze pro kontrolu.

První je potřeba určit teplo potřebné k ohřátí recoateru a prášku na požadovanou teplotu:

$$\begin{aligned} Q_{12t\acute{e}lo} &= c_{1.4301} \cdot m_{t\acute{e}lo} \cdot (T_2 - T_1) = \\ &= 6,723 \text{ kg} \cdot 500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot (673,15 - 293,15) \text{ K} = \\ &= 1,111 \cdot 10^6 \text{ J} \end{aligned} \quad (2)$$

Pro výpočet tepla potřebného na ohřev prášku bylo použito tří materiálů: mědi (Cu), titanu (Ti), a běžné konstrukční oceli.

$$\begin{aligned} Q_{12pr\acute{a}šekCu} &= c_{Cu} \cdot m_{pr\acute{a}šekCu} \cdot (T_2 - T_1) = \\ &= 383 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 6,972 \text{ kg} \cdot (673,15 - 293,15) \text{ K} = \\ &= 1,0147 \cdot 10^6 \text{ J} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} Q_{12pr\acute{a}šekTi} &= c_{Ti} \cdot m_{pr\acute{a}šekTi} \cdot (T_2 - T_1) = \\ &= 523 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 3,615 \text{ kg} \cdot (673,15 - 293,15) \text{ K} = \\ &= 0,7185 \cdot 10^6 \text{ J} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} Q_{12pr\acute{a}šekOcel} &= c_{Ocel} \cdot m_{pr\acute{a}šekOcel} \cdot (T_2 - T_1) = \\ &= 450 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 6,298 \text{ kg} \cdot (673,15 - 293,15) \text{ K} = \\ &= 1,077 \cdot 10^6 \text{ J} \end{aligned} \quad (5)$$

Nyní jsem schopen určit dobu přehřevu celé soustavy. Tyto časy jsou pouze teoretické, skutečná doba ohřevu bude větší. To je způsobeno zanedbáním tepelných ztrát.

$$t_{Cu} = \frac{Q_{12t\ddot{e}lo} + Q_{12pr\ddot{a}šekCu}}{W_{patron}} = \quad (6)$$

$$= \frac{1,2773 \cdot 10^6 J \cdot 1,0147 \cdot 10^6 \cdot J}{2\,000 W} = 17,72 \text{ min}$$

$$t_{Ti} = \frac{Q_{12t\ddot{e}lo} + Q_{12pr\ddot{a}šekTi}}{W_{patron}} = \quad (7)$$

$$= \frac{1,2773 \cdot 10^6 J \cdot 0,7185 \cdot 10^6 \cdot J}{2\,000 W} = 15,25 \text{ min}$$

$$t_{Ocel} = \frac{Q_{12t\ddot{e}lo} + Q_{12pr\ddot{a}šekOcel}}{W_{patron}} = \quad (8)$$

$$= \frac{1,2773 \cdot 10^6 J \cdot 1,077 \cdot 10^6 \cdot J}{2\,000 W} = 18,24 \text{ min}$$

V poslední řadě je třeba zkontrolovat tepelné ztráty. V potaz jsou brány pouze ztráty vedením stěnami vnitřního těla recoateru.

$$Q_{zt} = 2 \cdot \left(\frac{T_2 - T_1}{\frac{x_1}{\alpha_{1,4301}} + 2 \cdot \frac{x_2}{\alpha_{DURATEC}} \cdot \frac{x_3}{\alpha_{vzduch}} \cdot \frac{x_4}{\alpha_{DURAL}}} \right) \cdot S = \quad (9)$$

$$= 2 \cdot \left(\frac{673,15 K - 293,15 K}{\frac{30 \text{ mm}}{14,7 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}} + 2 \cdot \frac{6 \text{ mm}}{0,32 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}} \cdot \frac{1 \text{ mm}}{0,026 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}} \cdot \frac{1 \text{ mm}}{130 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}}} \right) \cdot 14\,224,5 \text{ mm}^2 = 69,3 W$$

Tepelné ztráty vedením tepla jsou nižší než celkový výkon topných patron.

5.3 Konstrukční materiály

5.3.1 Ocelové materiály

Ocelové díly v recoateru lze rozdělit na dva druhy, a to na díly, které jsou v přímém kontraktu s práškem a jsou vystaveny vysokým teplotám, a na díly vystavené pouze zvýšeným teplotám.

Díly vystavené teplotě přehřevu 400 °C jsou především díly střední části zařízení, které jsou v přímém kontaktu s práškem během stavby. Jedná se o vnitřní tělo recoateru, vymežovací prvky, soustavu hřidelů, dno recoateru, držák stěrky a krajní díly v kontaktu s izolací. Na konstrukci těchto dílů byla zvolena korozivzdorná ocel 1.4301, která disponuje dobrou obrobiteľností a relativně vysokou teplotní odolností [10]. Tuto ocel je možné dlouhodobě používat do teploty 450 °C, což je pro potřeby přehřevu na 400 °C dostačující.

Tabulka 5-2 Vlastnosti korozivzdorné oceli 1.4301 [11]

1.4301		
Hustota (při 20 °C)	[kg·m ⁻³]	7900
Modul pružnosti (při 400 °C)	[GPa]	172
Koeficient tepelné vodivosti λ	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	14,7
Měrná tepelná kapacita c	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	500

Díly, které nejsou v přímém kontaktu s práškem a jsou vystaveny pouze zvýšeným teplotám, nemají tak vysoké požadavky na teplotní odolnost. Jedná se především o krycí plechy a boční díl, na kterém jsou usazeny motory nanášecího systému. Pro omezení hmotnosti celého zařízení byl zvolen materiál EN AW-2024. Jedná se slitiny mědi a hliníku (AlCu₄Mg₁), tyto slitiny jsou známější pod svým obchodním názvem dural [12]. Jedná se o lehce obrobiteľnou slitinu s velkou mechanickou pevností, kterou je možné dlouhodobě používat do teploty 150 °C. Hlavní výhodou hliníkového materiálu je jeho hustota a tím nízká hmotnost vyrobených dílů.

Tabulka 5-3 Vlastnosti slitiny EN AW-2024 [13]

EN AW-2024		
Hustota (při 20 °C)	[kg·m ⁻³]	2770
Koeficient tepelné vodivosti λ	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	130-150

5.3.2 Izolační materiál

Hlavním úkolem izolace je zabránění šíření vysokých teplot skrz zařízení do elektromotorů a do samotné tiskárny. Největší nároky jsou kladeny na koeficient prostupu tepla. Pro své vlastnosti byl vybrán materiál Duratec®-XP od společnosti Promat. Duratec®-XP je bezasbestová izolace na bázi kalciumsilikátu. Přednostmi tohoto materiálu jsou nízká teplotní vodivost, vysoká mechanická pevnost, vysoká teplotní a chemická odolnost a velmi dobrá obrobiteľnost. Duratec®-XP je možné dlouhodobě používat do teplot 700 °C [14]. Všechny izolační prvky zařízení jsou navrženy z desek o tloušťkách 6 mm a 12 mm.

Tabulka 5-4 Vlastnosti izolačního materiálu DURATEC®-XP [14]

DURATEC®-XP		
Hustota	[kg·m ⁻³]	1800
Koeficient tepelné vodivosti λ	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	0,32

5.3.3 Těsnící materiál

Pro bezporuchový chod celého zařízení je potřeba zajistit, aby se prášek nešířil mimo oblasti předehřevu a prostoru pro nanášení. Pro tyto účely byly zvoleny lisované těsnící kroužky z expandovaného grafitu. Tyto kroužky jsou vyráběny lisováním fólie z expandovaného grafitu o čistotě 98 % C [15]. Mají vysokou teplotní odolnost -200 °C až 650°C v oxidačním prostředí a až 3 000 °C v inertní atmosféře [16].

6 DISKUZE

Cílem této práce byl návrh úprav nanášecího zařízení pro tiskárnu 280HL od společnosti SLM Solutions pro tisk tenkostěnných dílů za vysokých teplot. Vzhledem k rozsahu úprav byla pozornost věnována především konstrukci nového zařízení. Dalším důvodem pro návrh nového zařízení byl úmysl nezasahovat až příliš do současného zařízení.

Zásadním problémem stávajícího zařízení je nanášení prášku. Stávající silikonovou stěrku není možné vzhledem k teplotám předehřevu využít. Byla proto navržena poddajná drátová stěrka, která by byla vhodná pro práci s tenkostěnnými díly. Test však ukázal, že i přes zarovnání drátů pomocí elektroerozivního obrábění, nejsme schopni docílit nanesení dostatečně rovnoměrné vrstvy. Optimálním řešením by bylo využít stěrku z uhlíkových vláken. Toto řešení využil ve svém experimentu J. Wilkes [6]. Nepodařilo se bohužel najít žádné informace ohledně výrobce nebo prodejce této stěrky a nebylo tak možné stěrku z uhlíkových vláken otestovat. Finální řešení proto využívá keramické stěrky, která je schopna odolat vysokým teplotám, je však možné použít také stěrku ocelovou.

Vlastní zařízení bylo navrženo na předehřev prášku na teplotu 400 °C a bude sloužit jako doplněk při stavbě s využitím experimentální vyhřívané komory, která je navržena pro teplotu předehřevu až 600 °C.

Předehřev byl zajištěn pomocí čtyř topných patron o celkovém výkonu 2 000 W, které jsou uloženy ve vnitřní části zařízení. Výkon byl volen tak, aby se doba předehřevu blížila k době, kterou potřebuje pro svůj předehřev experimentální komora. Teplota je kontrolována pomocí termočlánku, který je v přímém kontaktu s práškem.

Vzhledem k relativně vysoké teplotě předehřevu bylo potřeba vnitřní část, která je vystavena nejvyšším teplotám, odizolovat od ostatních částí zařízení. Pro své izolační účinky a velmi dobrou obrobiteľnosť byly zvoleny izolační desky z materiálu Duratec®-XP. Jedná se o bezasbestovou izolaci na bázi kalciumsilikátu. Pro snížení šíření tepla systémem nanášení byly hřídele rozděleny na 3 části spojené pomocí hřídelových spojek.

Navržené nanášecí zařízení umožní výzkum nových materiálů a rozšíří tím využití technologie SLM do dalších odvětví průmyslu. Pro dosažení lepších výsledků by bylo vhodné doplnit celý proces ještě o předehřev inertní atmosféry.

7 ZÁVĚR

Tato práce se zabývá konstrukčním návrhem nanášecího zařízení s předehřevem pro tiskárnu SLM 280 HL od Společnosti SLM Solutions. V práci je řešen pouze konstrukční návrh zařízení, systému dávkování a polohovací systém stěrky. Práce neobsahuje návrh řízení předehřevu ani rozvod kabeláže.

V rešeršní části práce je proveden rozbor současných metod předehřevu v oblasti 3D tisku technologií SLM. Dále jsou popsány hlavní funkce nanášecího zařízení. V této kapitole je také představena experimentální komora, kterou má práce doplňují o předehřev před prášku před nanášením.

Koncepční část práce se věnuje úpravě stávajícího zařízení a to především výběrem vhodné stěrky. Finální řešení pracuje se stěrkou keramickou.

Konstrukční část se věnuje návrhu samotného zařízení. Řešeny jsou zde především problematiky předehřevu prášku, izolace zařízení, dávkování prášku a polohování stěrky. Konstrukční část obsahuje také výpočty týkající se teploty předehřevu, doby předehřevu a výkonu topných patron. Tyto výpočty jsou velmi zjednodušené a slouží především pro kontrolu.

Hlavní i dílčí cíle práce byly splněny. Výstupem této práce je 3D CAD model nanášecího zařízení včetně výkresové dokumentace.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BREMEN, Sebastian, Wilhelm MEINERS a Andrei DIATLOV. Selective Laser Melting: A manufacturing technology for the future? *Laser Technik Journal* [online]. 2012, 9(2), 33–38. ISSN 1613-7728. Dostupné z: doi:10.1002/latj.201290018
- [2] KEMPEN, K.;VRANCKEN, B.; THIJS, L.; BUIS, S.; VAN HUMBREECK, J.;KRUTH, J. P. Lowering thermal gradients in Selective Laser Melting by preheating the baseplate. In: [online]. B.m.: University of Leuven (KU Leuven) Department of Mechanical Engineering, 2013, s. 400. Dostupné z: https://limo.libis.be/primo-explore/fulldisplay?docid=LIRIAS1748401&context=L&vid=Lirias&search_scope=Lirias&tab=default_tab&lang=en_US&fromSitemap=1
- [3] BAI, PEIKANG; LIU, BIN; LIU, ZENGLU; WANG, JIANHONG; ZHAO, ZHANYONG. SLS powder-laying roller [online]. CN106003724A. Dostupné z: https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/057084604/publication/CN106003724A?called_by=epo.org&q=powder spreading blade preheatingc
- [4] BRUNHUBER, C.; SOLLER, T. Device and method for additive manufacturing [online]. US2018297116A1. 2018. Dostupné z: https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/056997462/publication/US2018297116A1?q=SLM powder preheating&called_by=epo.org
- [5] LIU, Qi, Yoann DANLOS, Bo SONG, Baicheng ZHANG, Shuo YIN a Hanlin LIAO. Effect of high-temperature preheating on the selective laser melting of yttria-stabilized zirconia ceramic. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2015, 222, 61–74. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2015.02.036
- [6] WILKES, J, Yves Christian HAGEDORN, Wilhelm MEINERS a Konrad WISSENBACH. Additive manufacturing of ZrO₂-Al₂O₃ ceramic components by selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal* [online]. 2013, 19(1), 51–57. ISSN 13552546. Dostupné z: doi:10.1108/13552541311292736
- [7] BAI, Y.; QI, M.; YANG, Y. A protective gas preheating device for 3D part [online]. CN205888086U. Dostupné z: https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/057779058/publication/CN205888086U?q=SLM powder preheating&called_by=epo.org
- [8] GUAN, J.;JIANG, Y.; ZHANG, X. Multifunctional SLM device [online]. CN108394099A. 2018. Dostupné z: https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/063094748/publication/CN108394099A?q=SLM powder preheating&called_by=epo.org
- [9] MALÝ, M. *Experimentální komora pro testování speciálních materiálů technologií SLM*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství., 2017
- [10] INOX. 1.4301 [online]. [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <http://www.inoxspol.cz/nerezova-ocel-14301.html>
- [11] AK1234. *Nerezová ocel 17240* [online]. [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <http://www.ak1324.cz>

- [12] PROAL. *EN AW-2024* [online]. [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <https://proal.cz/hlinik/slitiny-hliniku/en-aw-2024/>
- [13] BATZ-BURGEL. *EN AW-2024* [online]. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://batz-burgel.com/en/metal-trading/aluminium-product-range/en-aw-2024/>
- [14] PROMAT. *Duratec®-XP* [online]. [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <https://www.promat-hpi.com/en-us/products/calcium-silicate/duratec-xp-products>
- [15] POKORNÝ. *Lisované kroužky z expandovaného grafitu* [online]. [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <https://www.tesneni.cz/cs/produkt/lisovane-krouzky-z-expandovaneho-grafitu>
- [16] COROLL. *Lisované grafitové kroužky* [online]. [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <https://www.coroll.cz/lisovane-grafitove-krouzky.html>
- [17] BACKER ELEKTRO CZ. *Topné patrony* [online]. [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <http://www.backer-elektro.cz/produkty/topne-patrony-s-vnitrim-napojenim-vyvodu>
- [18] ASW. *Ložiska do vysokých teplot* [online]. [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <https://www.asw-loziska.cz/produkty/loziska-do-vysokych-teplot/bhts-zz-350-c-detail>
- [19] TEA TECHNIK. *Šneková soukolí* [online]. [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <https://www.teatechnik.cz/typ/>

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

Q	teplo soustavy
m	hmotnost tělesa
c	měrná tepelná kapacita
T_1, T_2	teplota přehřevu, teplota okolního prostředí
x_1, x_2, x_3, x_4	tloušťka jednotlivých vrstev
S	obsah plochy
α	koeficient tepelné vodivosti
V	objem tělesa

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obrázek 1-1 Zjednodušené schéma procesu stavby [1].....	13
Obrázek 2-1 Schéma modulu předehřevu stavební desky [2]	14
Obrázek 2-2 Schéma nanášecího zařízení využívající váleček [3].....	15
Obrázek 2-3 Řez válečkem [3]	15
Obrázek 2-4 Schéma vynálezu pro předehřev prášku před nanesením [4].....	16
Obrázek 2-5 Předehřev za pomoci laseru Nd-YAG, a) monitorovací a řídicí centrum, b) stavební komora [5]	17
Obrázek 2-6 Schéma zařízení předehřevu laserem [6]	18
Obrázek 2-7 Laserem vyhřívaná oblast před skenováním [6]	18
Obrázek 2-8 Struktura vytištěných dílů, a) bez předehřevu, b) s předehřevem o teplotě 1 715 °C [6]	19
Obrázek 2-9 Schéma zařízení pro předehřev ochranné atmosféry [7]	19
Obrázek 2-10 Schéma multifunkčního SLM zařízení [8]	20
Obrázek 2-11 Řez částí zařízení [8].....	21
Obrázek 2-12 Recoater tiskárny SLM 280HL během stavby	22
Obrázek 2-13 Model experimentální komory a její umístění do prostoru tiskárny [9]	23
Obrázek 2-14 Systém vyhřívání [9].....	24
Obrázek 4-1 Keramická stěrka	28
Obrázek 4-2 Zařízení pro test nanášení.....	29
Obrázek 4-3 Profil nanesené vrstvy.....	30
Obrázek 5-1 Uložení recoateru do prostoru tiskárny	31
Obrázek 5-2 Rozložený pohled na vnitřní části z boku	32
Obrázek 5-3 Řez rozloženým pohledem vnitřní částí s izolací z boku	32
Obrázek 5-4 Rozložený pohled celé konstrukce izolace	33
Obrázek 5-5 Rozložený pohled uchopení stěrky	33
Obrázek 5-6 Model systému dávkování prášku.....	34
Obrázek 5-7 Schéma šnekového kola (vpravo) a šneku (vlevo).....	35
Obrázek 5-8 Schéma posuvu držáku stěrky.....	36
Obrázek 5-9 Řez recoaterem	37

11 SEZNAM TABULEK

Tabulka 5-1 Tabulka parametrů ozubení [19]	35
Tabulka 5-2 Vlastnosti korozivzdorné oceli 1.4301 [11].....	40
Tabulka 5-3 Vlastnosti slitiny EN AW-2024 [13]	40
Tabulka 5-4 Vlastnosti izolačního materiálu DURATEC®-XP [14]	41

12 SEZNAM PŘÍLOH

0-BP-1000

3-BP-0101

3-BP-0102

4-BP-0103

1-BP-0104

4-BP-0105

1-BP-0106

3-BP-0107

1-BP-0108

3-BP-0109

4-BP-0110

4-BP-0111

4-BP-0112

4-BP-0113

4-BP-0114

4-BP-0115

4-BP-0116

4-BP-0117

4-BP-0118

4-BP-0119

4-BP-0120

4-BP-0121

4-BP-0122

4-BP-0123

4-BP-0124

4-BP-0125

4-BP-0126

4-BP-0127

4-BP-0128

4-BP-0129